

## ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В АМОРФНИХ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТЯХ

Одосій З.М., к.т.н., професор, Шиманський В.Я., асистент, Піндра Б.В.,  
магістрант

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

Процес нанесення покриттів методами газотермічного напилення завжди супроводжується виникненням внутрішніх (залишкових) напружень [1, 2, 3]. В покриттях зазвичай виникають напруження всіх родів, причому їх величина коливається в залежності від методу і режимів напилення, товщини і складу покриття, попередньої підготовки поверхні, умов охолодження і т.п. Залишкові напруження можуть нерівномірно розподілятися в напиленому шарі і основному металі, мати протилежні знаки, досягати значних величин [1].

Очевидно, що залишкові напруження всіх родів виникають і в покриттях з аморфною структурою. Для аморфних, як і кристалічних, покриттів найбільш важливо оцінити напруження I роду, так як вони являються причиною руйнування більшості напилених систем. На такі напруження впливають нерівномірність теплового потоку і розподілу матеріалу в газо-порошковому струмені, нерівномірний нагрів деталі, її конструктивні параметри і т.п. [1].

Залишкові напруження I роду розраховують на основі розподілу температурних полів в системі "основа-покриття" в момент часу, що відповідає їх нульовим значенням в покритті, а саме під час його утворення [1]. Тому дуже важливо знати термічні умови напилення. Так як експериментальне визначення температурних полів проводити важко, інтерес представляють теоретичні методи розрахунку процесів теплопереносу в даних системах. Для вивчення напруженого стану в системі "покриття-основа" математичні моделі з дослідження теплових режимів в одиничній частинці, яка охолоджується на основі [1, 2] малопридатні, так як необхідні дані про рівні температур всього покриття в цілому.

В цьому аспекті більш прийнятні моделі з дослідження теплового стану "покриття в цілому - основа" [6-8]. Дані моделі розділяються на ті, в яких прийнято допущення про монотонний ріст товщини покриття [6, 7] і моделі дискретного росту [8]. Так як в реальних умовах газотермічне покриття наносять пошарово за кілька проходів, останній підхід до аналізу процесів теплопереносу становить найбільший інтерес. Разом з тим, хоча модель [8] розглядається в трьохмірній постановці з рухомим джерелом тепла, велика кількість допущень (ріст товщини покриття після одного проходу плазмотрону не враховується, лінійна постановка, всі обмежуючі поверхні адіабатичні і т.п.) приводить до невеликої точності розрахункових даних. Однак при розробці більш точних математичних моделей необхідно використовувати вказаний підхід [8] (трьохмірна постановка, рухоме джерело тепла, гаусівський розподіл теплового потоку в плямі напилення).

Встановлений при математичному моделюванні розподіл температурних полів в системі "покриття-основа" є основою для подальшого розрахунку

залишкових напружень [6-8]. При цьому необхідно розглядати не повністю сформоване покриття, а враховувати, що в дійсності залишкові напруження формуються при поступовому нарощуванні покриття і поступовому рості температури до певних кінцевих значень [5].

На основі аналізу залишкових напружень в плазмових покриттях Л.І. Дехтяр і В.С. Лоскутов запропонували: по-перше, виходячи із конкретних умов роботи деталі з покриттям, попередньо визначити вимоги до їх знаку і рівня, а по-друге, використовуючи різні технологічні прийоми, постаратися одержати покриття із заданими характеристиками по напруженнях. Відомі такі технологічні прийоми, що дозволяють одержати покриття з заданими характеристиками по напруженнях [1]:

- узгодження коефіцієнтів термічного розширення і інших властивостей покриття і основи;
- регулювання термічної дії газо-порошкового струменя на основу і покриття варіюванням режимів напилання;
- використання підшарів;
- нанесення багатошарових покриттів із різнорідних матеріалів;
- армування покриттів волокнами або дротами;
- регулювання геометричних параметрів і форми основи.

Необхідно відмітити, що при експлуатації деталей з покриттями прагнуть до напружень стиску, як більш безпечних.

У випадку використання закріплюючої приспособи, що обмежує ступінь свободи основи (наприклад, стискає її по довжині), на температурні напруження накладаються напруження, які виникають за рахунок цієї приспособи [5].

В літературі приводяться дані по залишкових напруженнях в залежності від різних умов напилання, властивостей матеріалів покриття і основи та подальшої обробки [1, 2, 3, 5]. Абсолютна величина залишкових напружень може мати самі різні значення. Наприклад, було виявлено напруження від +(200 - 300) МПа для покриттів із сталі І2Х18НІ2Т до -230 МПа для оксиду алюмінію [1]. Однак опубліковані дані по напруженнях містять протиріччя, які можна пояснити неточністю методів їх визначення. Приведені відомості про залишкові напруження в покриттях відносяться до часткових випадків і без повного знання умов одержання зразку дають мало інформації і не дозволяють встановити загальних закономірностей. Залишкові напруження, що виникають в покриттях, впливають практично на всі експлуатаційні характеристики напилених деталей [2, 5]. Вони можуть бути причиною появи тріщин і відшарувань, впливають на адгезійну і когезійну статичну і багатocyклову міцність, зносостійкість, термостійкість. Опубліковані дані про вплив залишкових напружень на властивості суперечливі, що зв'язано з багатофакторністю самих залишкових напружень. Така багатофакторність полягає в тому, що на експлуатаційні характеристики деталей з покриттями впливають не тільки значення і знак напружень, але і їх вид, розподіл по глибині деталі, градієнт [1, 2, 5, 6].

У випадку, коли в покритті виникають розтягуючі напруження, має місце пониження когезійної міцності при випробуваннях покриттів на розтяг [4]. Причому, якщо ці напруження перевищують границю міцності матеріалу покриття на розтяг, то в ньому виникає сітка тріщин, перпендикулярних до поверхні.

Збільшення внутрішніх напружень приводить до пониження міцності зчеплення покриття з основою. Так, наприклад, при рості температури нагріву до 400 °С, залишкові напруження в оксидному плазмовому покритті зростають з 2 до 10 МПа, а міцність зчеплення понижується з 15 до 1 МПа [1]. Аналогічним чином, при збільшенні товщини покриття зростають внутрішні напруження і зменшується його міцність зчеплення з основою [1].

При одночасній дії корозійного середовища і зовнішнього навантаження напруження стиску підвищують стійкість деталей, а розтягуючі можуть привести до корозійного розтріскування.

Більшість видів покриттів понижують витривалість деталей (втомну міцність). Основна причина цього - розтягуючі залишкові напруження. Формуванням залишкових стискаючих напружень в покритті можна підвищити міцність деталі на втому.

На стійкість до зношування, крім залишкових напружень, впливають інші властивості металу - твердість, пластичність і т.п. В цьому разі необхідне комплексне дослідження внутрішніх напружень і властивостей поверхневого шару.

#### **Література:**

1. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. - М.; Машиностроение, 1981. - 192 с.
2. Кудинов В.В. Плазменные покрытия, - М.: Металлургия, 1978. -160 с.
3. Вирник А.М., Морозов И.А., Порзей А.В. К оценке остаточных напряжений в покрытиях, нанесенных плазменным напылением. //Физика и химия обработки материалов.- 1970.- К 4.- ч. 53-58.
4. Барвинок В.А., Борисов Л.И., Фокин В.Г. Определение остаточных напряжений в покрытиях плазменного напыления. //Иzv. вузов. Машиностроение, - 1974.- N 5. – с. 115 – 119.
5. Барвинок В.А., Богданович В.И. Расчёт остаточных напряжений в плазменных покрытиях с учётом процесса наращивания. //Физика и химия обработки материалов. – 1981.- К 4.- с. 95-99.
6. Теплообмен и термические напряжения при нанесении газотермических покрытий на подложку. /И.Л.Куприянов, М.А.Геллер, Г.Е.Горелик, А.В.Мазовко. //Физика и химия обработки материалов. – 1986. - К 6.- с. 24 – 27.
7. Pawlovski L, Temperature distribution in plasma-sprayed coatings. //Thin Solid Films. - 1981. - N 1. - P. 79 – 81.
8. Лупаков И.С., Калинин Г.М., Иванов В.М. Методика расчёта температуры нагрева изделия при плазменном напылении, //Теория и практика газотермического нанесения покрытий. -Г. И.Рига: Зинагне, 1960. - с. 19 – 29.